

МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ КОНТАКТНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ УПЛОТНЕНИЙ

Лиманов И. А., Квятковская И. Ю., Лиманова Н. И., Лиманов А. В.
Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Контактные кольцевые уплотнения вращающихся валов турбомашин двигателей летательных аппаратов сводят к минимуму утечки рабочего тела (жидкости, газа) между ротором и неподвижными элементами статора. К их особенностям относятся трудности расчета и эксперимента, связанные с силами упругости, давления и центробежными силами, действующими на уплотнительные кольца [1].

В данной работе рассматривается автоматизированная система морфологического синтеза и выбора наилучшего решения из элементарных звеньев – физико-технических эффектов (ФТЭ) для радиально – торцевых уплотнений с наружной цилиндрической и торцевой рабочими поверхностями, выполняемых с нерегулируемыми параметрами [2].

Морфологический подход к поиску новых технических решений, основанный на анализе и синтезе конструктивных реализаций, является эффективным средством для поиска новых технических решений, поскольку позволяет учесть полностью все мыслимые и существующие варианты. Он базируется преимущественно на комбинаторном принципе поиска решений, позволяя планомерно закладывать в морфологические множества огромное число аналогов.

Описание всех потенциально возможных решений данной задачи может быть представлено в виде морфологической таблицы (МТ) или морфологического дерева. МТ – это классификационная таблица, каждая строка которой представляет собой классификацию множества исследуемых систем по какому – либо существенному признаку. Классификационный признак (K_j) – функционально – значимое общее свойство множества конструктивных реализаций ФТЭ. Значение классификационного признака – это одно из значений подмножества морфологического множества технических реализаций ФТЭ. Морфологическая матрица (ММ) – это совокупность разделенных на значения классификационных признаков ФТЭ, где P_j^i – значение j – го признака, $i = 1, 2, \dots, m_j$ – число значений j – го признака.

Этап морфологического синтеза новых технических решений включает:

1. Оценку всех, имеющихся в морфологической матрице вариантов по совокупности эксплуатационных характеристик.
2. Выбор из морфологической матрицы одного или нескольких оптимальных вариантов технического решения по совокупности эксплуатационных характеристик.

Морфологическая таблица – матрица, как многопризнаковая классификация исследуемых технических решений может служить не только для достижения исходной цели – выбора варианта технического решения многих других задач, таких, например, как организация соответствующих информационных массивов, построение информационно – поисковых систем и т. д. Построение ММ для ФТЭ основано на блочном принципе, предполагающем, что каждое значение морфологических множеств может рассматриваться, в свою очередь, как морфологическое множество, подлежащее дальнейшей декомпозиции. Таким образом, ММ ФТЭ обладают свойством вложенности, т. е. в качестве значения морфологического признака может выступать система морфологических признаков более глубокого уровня.

Известен подход к синтезу конструктивных реализаций ФТЭ на основе морфологического анализа, в котором ММ составляется на устройство в целом. Вследствие этого в качестве морфологических признаков могут выступать сами ФТЭ. Количество значений каждого признака (одинаковое для всех признаков) равно количеству выбираемых отдельных и парных противоречивых эксплуатационных характеристик ФТЭ. Основным недостатком такого подхода является то, что ММ составляются на устройство в целом, а не на ФТЭ, лежащие в основе их физического принципа действия, в результате чего при постановке новой проектной задачи необходимо заново анализировать определенный класс технических изделий и разрабатывать новую морфологическую матрицу. В данной работе используются ММ, обладающие свойством вложенности. Это позволяет в ММ сравнительно небольшого размера сконцентрировать связанные знания о конструктивных реализациях (существующих и возможных) каждого ФТЭ, накапливать в базе данных (БД) ММ элементарных ФТЭ и впоследствии синтезировать на их основе новые принципы действия технических устройств и варианты их возможных конструктивных реализаций. Полное описание банка данных по морфологии с учетом знаний эксплуатационных характеристик по номинальной шкале оценок является ядром системы по созданию новых контактных уплотнений.

На рис. 1 представлена морфологическая матрица ФТЭ между температурой U_T на входе и линейной силой U_{ML} на выходе. Все ММ, использованные в банке ФТЭ, имеют данную типовую структуру. Опи-

сание каждого варианта исполнения конструктивного признака сопровождается графической скелетной конструкцией, используемой автоматизированной системой для визуализации принципа действия синтезированного технического устройства.

Разработана методика составления морфологических матриц, включающая:

- этап морфологического анализа ФТЭ, выявление его основных структурных элементов;
- описание классификационных признаков и их исполнений;
- поиск множества совместно недопустимых вариантов исполнений классификационных признаков;
- формирование множества критериев оценки классификационных признаков;
- ранжирование вариантов исполнений классификационных признаков;
- экспертные процедуры согласованности ранжировок.

В работе описываются процедуры и средства, необходимые для отбора наилучших решений по совокупности эксплуатационных характеристик. Систему критериев качества составляют: чувствительность, диапазон, погрешность, нелинейность, надежность, быстродействие, экологичность, КПД, цена, вес. База совокупности показателей состоит из общетехнических и предметно – ориентированных показателей и в целом эффективно отражает все качества описываемой модели. Отсутствие сильной зависимости между введенными критериями качества является необходимым требованием к системе критериев, выведенных для оценки множества решений, и позволяет применять совокупность критериев в целом при решении задач оптимизации. Проведен статистический анализ с использованием процедуры разбиения множества критериев на классы. Структурирование информации методами кластерного анализа, исследование корреляционных связей позволило определить отсутствие сильных зависимостей между введенными критериями. Таким образом, рассматриваемая система критериев достаточно полна и избыточна.

При решении задачи выбора наилучших технических решений по совокупности эксплуатационных характеристик применяются различные критерии отбора признаков (Рис. 2). Целесообразность применения того или иного метода определяется характером анализируемой информации, основанной либо на численных оценках альтернатив, либо на оценках предпочтительности альтернатив [3].






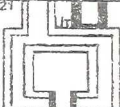
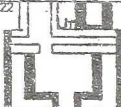
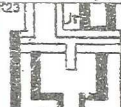
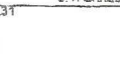







Морфологическая матрица ФТЭ между температурой U_T на входе и линейной силой U_{ML} на выходе														
выход														
1. Форма упругого элемента														
1.1. Цилиндрическая вставка			1.2. Коническая винтовая			1.3. Плоская изогнутая								
	K11	2 1 4 2 3 3 1 4 2 5 2 6 6 7 2 8 4 9 4 10		K12	3 1 5 2 4 3 2 4 8 5 1 6 3 7 5 8 3 9 3 10		K13	4 1 1 2 1 3 2 4 3 5 3 6 1 7 4 8 2 9 1 10						
1.4. Трехлуччатая			1.5. Плоская U-образная			<div>ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ 1 ЦЕНА 2 НАДЕЖНОСТЬ 3 ПОГРЕШНОСТЬ 4 НЕЛИНЕЙНОСТЬ 5 ДИАПАЗОН 6 КПД 7 БЫСТРОДЕЙСТВИЕ 8 ЭКОЛОГИЧНОСТЬ 9 ВЕС 10</div>								
	K14	1 1 3 2 2 3 3 4 4 5 7 6 5 7 5 8 5 9 5 10		K15	5 1 2 2 6 3 4 4 7 5 4 6 2 7 5 8 1 9 2 10									
2.1. Снаружи			2.2. По упругому элементу			2.3. Нагрев изнутри								
	K21	3 1 5 2 1 3 2 4 2 5 2 6 2 7 2 8 3 9 3 10		K22	1 1 1 2 3 3 6 4 6 5 1 6 3 7 1 8 2 9 3 10		K23	5 1 4 2 2 3 3 4 1 5 3 6 1 7 3 8 1 9 2 10						
3.1. Сплошной			3.2. Толстый											
	K31	2 1 1 2 1 3 3 4 3 5 1 6 1 7 5 8 2 9 1 10		K32	1 1 2 2 4 3 1 4 1 5 3 6 1 7 1 8 1 9 5 10	<div>ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ 1 ЦЕНА 2 НАДЕЖНОСТЬ 3 ПОГРЕШНОСТЬ 4 НЕЛИНЕЙНОСТЬ 5 ДИАПАЗОН 6 КПД 7 БЫСТРОДЕЙСТВИЕ 8 ЭКОЛОГИЧНОСТЬ 9 ВЕС 10</div>								
4.1. Механический фиксатор			4.2. Пневмо (гидро) - фиксатор			4.3. Электромагнитный								
	K41	3 1 2 2 1 3 1 4 1 5 7 6 1 7 1 8 9 9 3 10		K42	2 1 4 2 5 3 7 4 2 5 2 6 3 7 3 8 6 9 1 10		K43	6 1 2 2 2 3 5 4 3 5 1 6 2 7 2 8 3 9 2 10						
5.1. Бронза			5.2. Сталь			5.3. Сплав с эффектом памяти								
	K51	1 1 6 2 1 3 3 4 3 5 3 6 1 7 5 8 2 9 3 10		K52	7 1 1 2 4 3 2 4 1 5 1 6 5 7 3 8 1 9 2 10		K53	6 1 3 2 1 3 1 4 2 5 8 6 3 7 1 8 3 9 1 10						
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ						ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ 1								
						ЦЕНА 2								
						НАДЕЖНОСТЬ 3								
						ПОГРЕШНОСТЬ 4								
						НЕЛИНЕЙНОСТЬ 5								
						ДИАПАЗОН 6								
						КПД 7								
						БЫСТРОДЕЙСТВИЕ 8								
						ЭКОЛОГИЧНОСТЬ 9								
						ВЕС 10								

Рисунок 1 - Морфологическая матрица ФТЭ между температурой U_T на входе и линейной силой U_{ML} на выходе.

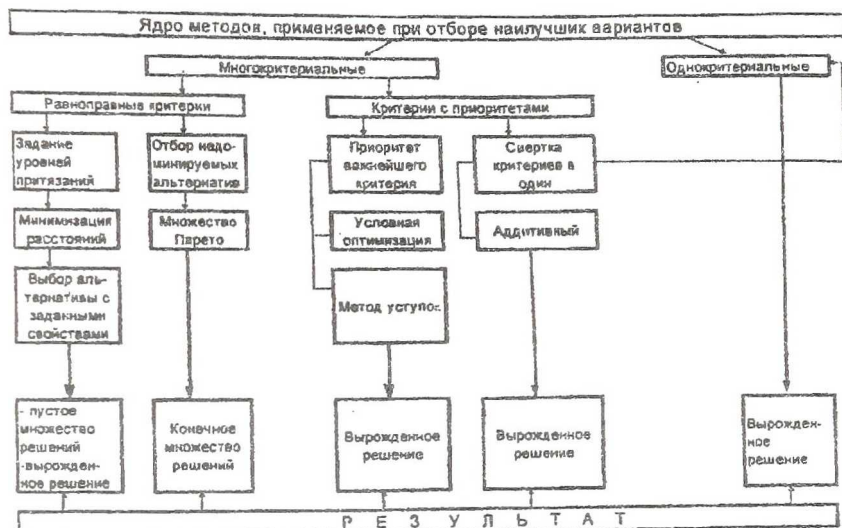


Рисунок 2 – Критерии отбора признаков

Для оценки сгенерированного технического решения – альтернативы по совокупности числовых эксплуатационных характеристик используется аддитивная функция:

$$W(l, x_k) = \sum_{i=1}^m K(i, j_0(i), k) \quad j_0 \in \{1, 2, \dots, q(i)\}; \quad l = 1, \dots, C; \quad k = 1, \dots, 10$$

где l – порядковый номер альтернативы из множества, обусловленного задачей выбора; x_k – k – й критерий качества, обобщенная оценка для которого получена путем суммирования отдельных нормированных оценок вариантов исполнения конструктивных признаков; m – количество конструктивных признаков; $q(i)$ – размерность i – го множества конструктивных признаков; $j_0(i)$ – номер варианта исполнения i – го конструктивного признака, отобранного в соответствии с некоторым критерием выбора; $C = \prod_{i=1}^m q(i)$ – число всевозможных вариантов конст-

рукций по морфологической таблице; $K(i, j, k)$ – массив числовых оценок альтернатив по i – му признаку, j – му исполнению признака и k – му критерию качества (эксплуатационной характеристике).

Для случая равноважных критериев вводится нормированный вектор весовых коэффициентов $\alpha(k)$ ($k = 1, 2, \dots, 10$) и используется схема свертки:

$$W(l, x_k) = \sum_{i=1}^m \alpha(k) \cdot K(i, j_0, (i), k) \quad \text{где} \quad \sum_{k=1}^{10} \alpha(k) = 1$$

Вводимая функция рассматривается как линейная, так как при помощи методов сепарабельного программирования удастся преобразовать задачи оптимизации определенного типа к задаче, содержащей только линейные функции. Предложен способ генерации требуемого множества технических решений в соответствии с проектной ориентацией задач, использующий алгоритм свертки альтернатив в соответствии с функцией выбора, позволяющей перейти от иерархического представления данных с большим уровнем вложенности к реляционному представлению для использования на последующих этапах разработки программного обеспечения.

Реализован способ описания каждой альтернативы в виде двумерного массива, строки которого – номера альтернатив, ранжированных в соответствии с задачей выбора, столбцы – критериальные значения.

Решение однокритериальной задачи – поиск наилучшего решения по одной эксплуатационной характеристике сводится к решению задачи векторной оптимизации, в которой частные показатели сведены к обобщенному показателю (целевой функции). В процессе решения задачи могут быть дополнительно установлены пороговые значения критериев в виде равенств или неравенств.

Поиск единственного наилучшего решения по совокупности критериев осуществляется на множестве возможных решений Ω :

- либо с использованием суперкритерия (аддитивной функции)

$$U = \sum_{i=1}^m \alpha_i \cdot x_{ni}$$

где α_i – параметр весомости i – го частного критерия; x_{ni} – нормированный или относительный i – ый частный критерий ($x_{ni} = x_i/x_i^0$, где x_i – значение частного критерия; x_i^0 – нормирующий коэффициент той же размерности, что и x_i), принадлежащий отрезку $[0,1]$.

- либо с использованием метода идеальной точки, которая оптимальна сразу по всем критериям:

$$\rho(w, a) = \sum_{i=1}^{10} |w - a|, \quad \text{где} \quad \rho(w, a) \rightarrow \min \quad (a - \text{идеальная точка}, w \in a)$$

Решена задача поиска технического решения с заданными свойствами, значения критериев которого заранее известны. Определяется мера числовой близости между требуемой альтернативой и ближайшей:

$\overline{w}(x_1, \dots, x_n)$ и $w(x_1, \dots, x_n)$. Для этого используется формула расстояний между \overline{w} и w :

$$\rho(\overline{w}, w) = \min \rho_1(\overline{x}_i, x_i) + \alpha_n \cdot \sum_{i=1}^n \rho_1(\overline{x}_i, x_i),$$

$$\text{где } \rho_1(\overline{x}_i, x_i) = \alpha_i \cdot |\overline{x}_i - x_i|$$

α_i — нормирующие коэффициенты, учитывающие приоритетность критериев, α_n — коэффициент, регулирующий суммарную близость к цели всех критериев.

В процедуре решения задачи автоматизированного многокритериального выбора альтернатив использовано последовательное усечение множества всевозможных альтернатив Ω сначала по условиям и ограничениям до множества допустимых вариантов Ω_d , а затем, посредством введения критериальных требований, до множества оптимальных решений. Такая последовательность усечений наиболее приемлема для однократного решения задачи многокритериального выбора, в частности в задачах поискового проектирования, хотя проектно — ориентированных системах автоматизированного выбора подобные задачи решаются многократно, для различных постановок допустимости альтернатив и критериальных требований.

При определении ограничений на значения критериев $x_1, \dots, x_{j-1}, x_{j+1}, \dots, x_n$ либо не учитывается приоритетность критериев, либо выделяется главный критерий и определяются ограничения на остальные критерии:

$$x_i \leq C_i \text{ либо } x_i \geq C_i, \quad i = 1, \dots, j-1, j+1, \dots, n$$

Поиск требуемой альтернативы w^* в этом случае осуществляется:

$$w^* = \arg(\min_{x \in X, w \in \Omega} w(l, x_j) | x_i \leq C_i, i \neq j)$$

или, при ограничениях снизу

$$w^* = \arg(\min_{x \in X, w \in \Omega} w(l, x_j) | x_i \geq C_i, i \neq j)$$

Для определения множества нехудших конструктивных решений применяется отношение доминирования P для альтернатив w_1 и w_2 : $w_1 \leq w_2$, если $x_1(i) \leq x_2(i)$ ($i = 1 \dots 10$), причем хотя бы одно неравенство строгое:

$$(\forall w(i), w(j) \in \Omega \mid i, j \in \{1, \dots, |\Omega|\}) [w(i) P w(j)] \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \{(\forall k = 1, \dots, 10) [w(i, x_k) \leq w(j, x_k)] \& (\exists k_0 \in \{1, \dots, 10\}) [w(i, x_{k_0}) < w(j, x_{k_0})]\}.$$

Отбор и отбрасывание всех доминируемых вариантов приводит к множеству Парето, определяемому как

$$\Omega^P \in \Omega : \Omega^P = \{w^P \in \Omega \mid (\forall w \in \Omega) [w \bar{P} w^P]\}.$$

Практика показывает, что критерий Парето является в некоторых случаях слабым и отбраковывает из исходного множества незначительное количество вариантов. Для этого процесс отбора недоминируемых альтернатив объединяется с усечением исходного множества до некоторого множества допустимых решений, меньшей размерности: $\Omega^P \subseteq \Omega_D \subseteq \Omega$, $|\Omega^P| \leq |\Omega_D| \leq |\Omega|$. Реализован принцип отбора

множества Парето для групп частных критериев, рассмотрен программный инструментальный для решения задачи морфологического синтеза.

Таким образом, разработана модель представления данных о многообразии конструкций контактных кольцевых уплотнений в виде морфологических матриц каждого физико-технического эффекта, создана методика синтеза и оценки эксплуатационных характеристик конструктивных реализаций отдельных ФТЭ и устройства в целом по совокупности экспертных оценок морфологических признаков. В результате создана автоматизированная система выбора наилучших уплотнительных колец по форме, по фиксирующей установке, по материалу, по способу подвода тепла, полученных при морфологическом синтезе.

Список литературы

1. Белоусов А.И., Зрелов В.А. Конструкция и проектирование уплотнений вращающихся валов турбомашин двигателей летательных аппаратов: Учебное пособие. – Куйбышев: Куйбышевский авиационный институт, - 1989 – 108 с.
2. Лиманов И.А., Лиманова Н.И., Лиманов А.В. Контактные кольцевые уплотнения с регулируемыми параметрами: Доклады международной научно – технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения в Поволжском регионе». Часть 1, - Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет. – 1997. – с.95-98.
3. Квятковская Н.Ю., Коженков С.А. Поиск оптимальных технических решений на этапе морфологического синтеза: VI Санкт-Петербургская Международная Конференция «Региональная информатика – 98» («РИ – 98»), Санкт-Петербург, Тезисы докладов. Часть 2. – СПб., 1998, с.13-14.